





Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Hidrofobik Yüzeylerin Türbülanslı Boru Akımlarında Sürtünme Kayıplarına Etkisinin Deneysel İncelenmesi

 Mustafa PEHLİVAN^{a,*},  Mustafa ÖZBEY^b

^a Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Kavak Meslek Yüksekokulu, Samsun Üniversitesi, Samsun, TÜRKİYE

^b Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: mustafa.pehlivan@samsun.edu.tr

DOI:10.29130/dubited.873308

ÖZ

Bu çalışmada, pürüzsüz bakır boru iç yüzeyi hidrofobik özellik kazandırılacak şekilde kaplanarak türbülanslı akımda basınç kaybı ve sürtünme faktörü üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Kaplama malzemesi olarak floridetenpropilen (FEP) ve bu temel malzemeye ağırlıkça %1 oranda grafen (FEP-G) ve grafit (FEP-C) ekleyerek elde edilen solüsyonlar kullanılmıştır. FEP, FEP-G ve FEP-C malzemeleri ile pürüzsüz bakır boru iç yüzeyleri spreysel yöntemle kaplanıp 400 °C sıcaklıkta kurutulmuş hidrofobik yüzeyler elde edilmiştir. İşlenmemiş konvansiyonel pürüzsüz bakır yüzeyi ile FEP, FEP-C ve FEP-G kaplı yüzeylerin hidrofobikliği temas açıları sırasıyla 65°, 93°, 96° ve 102° olarak ölçülerek belirlenmiştir. Türbülanslı akımda, 5000 – 30000 Reynolds sayıları aralığında deneysel olarak basınç kayıpları ölçülerek sürtünme faktörü belirlenmiştir. FEP, FEP-C ve FEP-G kaplı hidrofobik yüzeyler, konvansiyonel bakır yüzeye kıyasla 5000 – 30000 Reynolds sayısı aralığındaki türbülanslı akımda %7 - %36.1 aralığında sürtünme faktöründe bir azalma göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Hidrofobik yüzey, FEP kaplama, Türbülanslı akım, Basınç kaybı, Sürtünme faktörü

Experimental Investigation of the Effect of Hydrophobic Surfaces On Friction Losses in Turbulent Pipe Flows

ABSTRACT

In this study, the inner surface of the smooth copper pipe was coated with a hydrophobic material and an experimental study was made to determine the effect on the friction factor in turbulent flow. Fluoroid ethylene propylene (FEP) was chosen as the base coating material and 1% by weight of graphene and graphite are added to this base material to obtain FEP-G and FEP-C materials, respectively. The inner surface of the smooth copper pipe was coated with FEP, FEP-G and FEP-C materials by using the spray technique. Then coated pipe was dried at 400 °C to form hydrophobic surfaces. The contact angles representing the hydrophobicity of the uncoated conventional smooth copper, FEP, FEP-C, and FEP-G coated surfaces were measured as 65°, 93°, 96° and 102°, respectively. In the turbulent flow, the pressure losses in the range of 5000 – 30000 Reynolds numbers were experimentally measured and the friction factor was determined. As a result, the decrease in the friction factor in the range of 7% to 36.1% was determined.

Keywords: Hydrophobic surface, FEP coating, Turbulent flow, Pressure drop, Friction factor.

I. GİRİŞ

Mühendislik uygulamalarının büyük çoğunluğunda akışkanların transferi ile ilgili prosesler gerçekleşmektedir. Bunun için de toplam elektrik tüketiminin %20'sini oluşturan pompalama gücüne ihtiyaç duyulmaktadır [1]. Nüfusun ve endüstrileşmenin giderek artması ile enerjiye duyulan ihtiyacın da arttığı günümüzde özellikle de çevresel etkileri açısından enerji verimliliği daha büyük önem arz etmektedir.

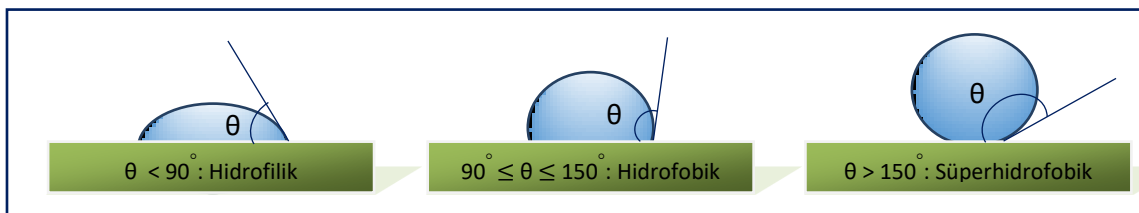
Pompalama sistemlerinde enerji tasarrufu sağlamanın bir yolu da boru akımlarındaki sürtünme kaynaklı basınç kayıplarının azaltılmasıdır. Pratikte, laminer akımdan daha çok türbülanslı akım rejimi ile karşılaşılır. Türbülanslı akımda meydana gelen basınç kaybı laminer akıma kıyasla daha yüksektir. Laminer boru akımlarında basınç kaybı akım hızı ile birinci dereceden doğru orantılı iken türbülanslı akımlarda hızın 1.75 üssü ile orantılı artmaktadır. Dolayısıyla türbülanslı akımlarda sürtünme kaynaklı basınç kaybı enerji tasarrufu açısından daha büyük önem arz etmektedir. Son yıllarda malzeme teknolojisine bağlı olarak gelişen yüzey işleme ve kaplama metotları uygulanarak sürtünme kayıplarını azaltmak üzerine teorik ve deneysel çalışmaların artmaya başladığı görülmektedir. Genel olarak, sürtünme kayıplarını azaltmak için yoğunlukla konvansiyonel yüzeyler düşük yüzey enerjili malzemeler ile kaplanarak hidrofobik yüzeyler elde edilmektedir.

Hidrofobiklik kısaca ıslanabilirlik olarak tanımlanır. Şekil 1'de görüldüğü gibi nilüfer bitkisinin yaprağı üzerinden yağmur damlasının hiçbir iz bırakmadan, yaprağın üzerindeki toz zerreciklerini toplayarak kayması hidrofobikliğe örnek olarak verilebilir.



Şekil 1. Nilüfer yaprağının hidrofobikliği [2]

Hidrofobiklik düzeyi temas açısı ölçülerek belirlenir. Temas açısı katı yüzey üzerindeki sıvı damlasının, temas ettiği yüzeyle temas noktasındaki teğetin yaptığı açıdır. Şekil 2'de görüldüğü gibi bu açının aldığı değere göre yüzeyin ıslanabilirliği için üç durum söz konusudur. Temas açısı 90° 'den küçükse hidrofilik (ıslanabilir), 90° 'den büyük ve 150° 'den küçük ise hidrofobik ve 150° 'den büyükse süperhidrofobik olarak adlandırılır [3].



Şekil 2. Yüzey hidrofobikliği

Temas açısı, sıvı-katı ara yüzey gerilimine, katının yüzey enerjisine ve yüzey pürüzlülüğüne bağlıdır. Sıvının yüzey enerjisi azaldıkça temas açısı ve buna bağlı olarak hidrofobiklik artar. Aynı zamanda hidrofobiklik katının yüzey pürüzlülüğü atıkça da artar. Pürüzlü olmayan yüzeylerde ölçülen temas açısı 120°'yi geçmez. Ancak, yüksek pürüzlülüğe sahip katı yüzeylerde, katı yüzeyi ile sıvı arasında bulunan hava, yüzeyler arası etkileşimi azaltarak hidrofobikliğini artırır [4].

Sürtünme faktörü (f) ile basınç kaybı (ΔP) arasındaki ilişki Eş. 1'de verilmiştir. Bu ilişki her iki laminer ve türbülanslı akım rejimi için de geçerlidir.

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (1)$$

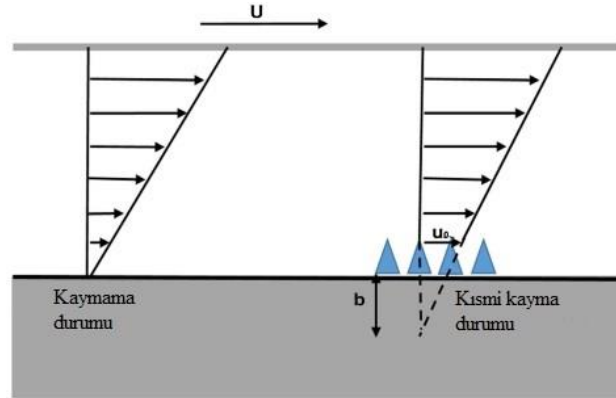
Laminer boru akımı için Darcy sürtünme faktörü aşağıdaki gibidir.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2)$$

Pürüzsüz borularda türbülanslı akım için ise sürtünme faktörü, aşağıdaki Blasius bağıntısı ile verilir [5].

$$f = \frac{0,316}{Re^{1/4}} \quad (3)$$

Hidrofobiklik yüzeyde kayma olmama şartını ortadan kaldırmaktadır. Bunun sebebi, hidrofobik özellik sayesinde sıvının katı yüzeyle temas ettiği alanın azalması ve buna bağlı olarak sıvı damlalarının katı yüzey üzerinde yuvarlanması şeklinde açıklanabilir. Kayma gerilmesini etkileyen bu durum kesit boyunca meydana gelen hız gradyeni (deformasyon hızı) üzerinde doğrudan etkilidir. Bu durumda yüzeydeki hız gradyeni azalarak kayma gerilmesini, dolayısıyla sürtünme kuvvetini de düşürecektir. Aynı zamanda Şekil 3'te görüldüğü üzere hidrofobik bir yüzeyde kayma olmama şartı ortadan kalktığından akım hızı sıfırdan farklı olacaktır. Yüzey üzerinde gelişen hız kayma hızı ve Şekil 3'te gösterildiği gibi b mesafesi de kayma uzunluğu olarak adlandırılır [6].



Şekil 3. Hidrofobik özelliğin hız profili üzerindeki etkisi [6].

Yüzeyde kayma olduğu durumda yüzeydeki kayma gerilmesi (τ_w) ile kayma hızı (u_k) arasındaki oran kayma katsayısı (m) olarak ifade edilebilir. Bu durumda, u_k değeri kayma gerilmesi tanımından laminer boru akımı için aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\tau_w = -\mu \frac{du}{dr} = -\frac{dP}{dx} \frac{R}{2} = m u_k \quad (4)$$

$$u_k = -\frac{dP}{dx} \frac{R}{2m} \quad (5)$$

Ayrıca yüzeydeki hız gradyeni, kayma hızının kayma uzunluğuna (b) oranı olarak tarif edilebilir. Bu durumda yüzeydeki kayma gerilmesi;

$$\tau_w = \mu \frac{u_k}{b} \quad (6)$$

şeklini alır. Bu denklem, Eş. 4'te verilen kayma gerilmesi bağıntısı ile birleştirilirse kayma katsayısı aşağıdaki gibi olur.

$$m = \frac{\mu}{b} \quad (7)$$

Laminer boru akımı için aksenal hız (u) bağıntısı aşağıdaki gibidir;

$$u = \frac{r^2}{4\mu} \frac{dp}{dx} + c \quad (8)$$

hidrofobik yüzeylerde $r = R$ için, $u = u_k$ sınır şartı uygulandığında c sabiti,

$$c = \left(\frac{R}{2m} + \frac{R^2}{4\mu} \right) \left(-\frac{dP}{dx} \right) \quad (9)$$

olarak belirlenir ve laminer akım için hidrofobik yüzeylerde, yani yüzeyde kayma durumunda hız profili aşağıdaki formu alır.

$$u = \left[\frac{R^2}{4\mu} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) + \frac{R}{2m} \right] \left(-\frac{dP}{dx} \right) \quad (10)$$

Bu durumda hacimsel debi (Q) ve ortalama akım hızı (V) bağıntıları sırasıyla aşağıdaki gibi olur.

$$Q = \int V A dA = \int_0^R u 2\pi r dr = \int_0^R \left[\frac{R^2}{4\mu} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) + \frac{R}{2m} \right] \left(-\frac{dP}{dx} \right) 2\pi r dr \quad (11)$$

$$Q = -\frac{\pi R^2}{8\mu} \left(\frac{dP}{dx} \right) \left(1 + \frac{4\mu}{Rm} \right) \quad (12)$$

$$V = \frac{Q}{A} = -\frac{R^2}{8\mu} \frac{dP}{dx} \left(1 + \frac{4\mu}{Rm} \right) \quad (13)$$

Bu denklem, boru çapı (D) ve $-dP/dx = \Delta P/L$ esas alınarak düzenlenirse;

$$\Delta P = \frac{32\mu VL}{D^2} \frac{1}{\left(1 + \frac{4\mu}{Rm} \right)} \quad (14)$$

şeklini alır. Bu ilişkiden Eş. 1'e göre laminer hidrofobik boru akımı için sürtünme faktörü;

$$f = \frac{64}{Re} \frac{1}{\left(1 + \frac{4b}{R} \right)} \quad (15)$$

olur. Hidrofilik bir yüzeyde, yani kaymama koşulu olması durumunda kayma uzunluğu sıfır olur ve bu durumda denklem konvansiyonel bir yüzey için olan laminer akım sürtünme faktörü bağıntısı ile aynı olur. $4b/R$ eklentisi hidrofobik laminer akım düzeltme katsayısı (m_l) olarak anılabilir.

$$f = \frac{64}{Re} \frac{1}{(1+m_l)} \quad (16)$$

Tretheway ve Meinhart [7], hidrofobik malzeme ile kaplı cam yüzeylerde mikrokanal içindeki ortalama akım hızının %10'u kadar bir kayma hızı oluştuğunu ve kayma uzunluğunun da 1 μ m olduğunu tespit etmişlerdir. Ríos-Rodríguez vd. [8] de hidrofobik malzeme ile kapladıkları cam boruda 70-250 Reynolds sayısı aralığındaki laminer akımda PIV ölçümleri ile kaplanmamış cam

boruya kıyasla %20 oranında sürtünmede azalma tespit etmişlerdir. Ou vd. [9] de mikrokanallarda akım yönünde mikro çıkıntılar oluşturarak elde ettikleri süperhidrofobik yüzeyde deneysel olarak maksimum kayma hızının ortalama akım hızının %60'ı kadar olduğunu belirlemişlerdir, ayrıca süperhidrofobik yüzey üzerindeki kaymanın sürtünme faktörünü azaltan en önemli faktör olduğunu vurgulamışlardır. Ybert vd. [10] ise yaklaşık 50-100 nm çapında, 5 µm aralıklı sütunlardan oluşan bir yüzeyde 179°'den daha büyük bir temas açısı elde etmişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda böyle bir süperhidrofobik yüzeyde kayma uzunluğunu 100 µm olarak ölçmüşlerdir.

Henoch vd. [11] ürettikleri süperhidrofobik yüzeyleri su tüneline teste tabi tutarak laminer akımdaki sürtünmenin yaklaşık %50 kadar azaldığını, ancak akım türbülanslı akıma yaklaşıırken bu oranın düştüğünü belirlemişlerdir. Daniello vd. [12] de yaptıkları deneysel çalışmada aldıkları PIV sonuçlarına göre pürüzsüz konvansiyonel yüzeye kıyasla süperhidrofobik yüzeyli mikro kanalda türbülanslı akım için birim uzunluk başına basınç kaybının %50'den daha fazla azaldığını tespit etmişlerdir. Truesdell vd [13] ise düzenli oluklu bir yapı oluşturarak süperhidrofobik bir yüzey elde etmiş ve düşük Reynolds sayılarında yüzeydeki kayma durumunu incelemişlerdir. Bu yapının etkili sıvı-yüzey temas alanını azalttığını ve dolayısıyla yüzeyde kayma meydana geldiğini ve sürtünme faktörünü azalttığını ortaya koymuşlardır.

Martell vd. [14], mikro-geometri yapıları ile oluşturdukları süperhidrofobik yüzeylerin, türbülanslı akımlarda laminer alt tabakayı deforme ettiği ve buna bağlı olarak sürtünme faktörünü azalttığını ortaya koymuşlardır. Mikro-geometriye bağlı olarak simüle edilen en büyük farkın, kayma hızının süperhidrofobik olmayan yüzeydeki ortalama akım hızının %80'inin üzerinde olduğu ve duvar kayma gerilmesinin süperhidrofobik olmayan yüzeye göre %50'den fazla azaldığını belirlemişlerdir. Ayrıca, Martell vd. [15] daha önce yaptıkları bir çalışmada, süperhidrofobik duvarın yakınındaki ortalama hız profilinin, duvar kayma gerilmesi ile ölçeklenmeye devam ettiğini, ancak bunların temel olarak mikro-geometride oluşan hava boşluklarına bağlı bir kayma hızı ile dengelendiğini göstermişlerdir.

Jeffs vd. [16] akış yönüne paralel olarak tasarlanmış desenli süperhidrofobik yüzeyli kanallarda Reynolds sayısının 4×10^3 ile 4×10^4 arasında değiştiği akımlarda yaptıkları teorik çalışma ile Woolford vd. [17] tarafından deneysel olarak aynı Reynolds sayısı arasında yaptıkları çalışmada sürtünme kuvveti ve sürtünme faktöründe sırasıyla %11 ve %14.5 oranında azalma belirlemişlerdir. Tian vd. [18] PIV ölçüm tekniği ile süperhidrofobik yüzeyde hidrofilik yüzeye oranla %10, Volkov vd. [19] ise aynı özellikteki hidrofobik yüzeylerin hidrolik sürtünmeyi %15.5-23 oranında düşürdüğünü kaydetmişlerdir.

Chinappi, M. ve Casciola [20] pürüzsüz malzeme yüzeylerini hidrofobik olarak kaplamış ve moleküler dinamik simülasyon (MD) tekniği ile 20 nm ölçülen kayma uzunluğunu Cottin-Bizonne vd. [21] tarafından deneysel olarak 0.2-0.5 nm olarak belirlemişlerdir. Bu iki sonuç arasındaki farkın sıvı – katı yüzeyi arasında oluşan hava katmanından kaynakladığına dikkat çekmişlerdir. Nouri vd. [22] ise yaptıkları teorik çalışmada hidrofobik yüzeylerdeki sürtünme düşüşünü Large Eddy Simulation (LES) türbülans modeli kullanarak çözümlenmişlerdir. Buldukları %30 sürtünme düşüşünü doğrudan sayısal simülasyon (DNS) modeli ile de doğrulamışlardır. Bu sürtünmedeki düşüşün sebebini duvar yakınındaki türbülanslı yapının yüzeydeki kayma hızı ile değişmesi olarak açıklamışlar ve bu etkinin de kayma uzunluğunun belirli bir değeri aştığında oluştuğunu belirlemişlerdir. Jelly vd. [23] de süperhidrofobik bir kanal yüzeyindeki türbülanslı akımı DNS yöntemi ile incelemiş ve yüzey kaplamasının türbülans ve sürtünme faktörü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Kayma oluşmayan yüzeye göre sürtünme faktöründe %21.6 oranında azalma tespit etmişlerdir.

Fiolava vd. [24] hidrofobik malzeme ile kaplı paralel plakalar arasındaki laminer akım için duvardaki kayma koşulunu ve buna bağlı olarak oluşan hız profilini incelemişlerdir. Başka bir çalışmalarında [25] hidrofilik ve süperhidrofobik yüzeylerdeki hız profilini PIV tekniği ile incelemişlerdir. Süperhidrofobik yüzeylerde kayma hızının oluştuğunu ve bu kayma hızının Reynolds sayısı arttıkça azaldığını tespit etmişlerdir. Bir diğer çalışmalarında [26] türbülanslı akım için k-ε modeli ile hidrofobik yüzeylerin çözümünü yapmışlardır. Türbülanslı akım için yüzeyde kayma olması durumunda yüzeyde hızın çalkantı bileşeni, u' , oluşacağı ve dolayısıyla burada türbülans kayma

gerilmelerinden söz edilmesi gerektiğine ve bu durumda yüzeyde türbülans viskozitesi, μ_t , de oluşacağına dikkat çekmişlerdir.

Aljallis vd. [27], hidrofobik nano partiküllerin püskürtülmesi ile oluşturulan süperhidrofobik kaplamanın yüksek hızlı çekme tankı sisteminde deneye tabii tutarak sürtünme etkilerini incelemişlerdir. Sonuç olarak, daha yüksek temas açısına sahip, yani sıvı-katı ara yüzeyinde hava katmanı oluşan, süperhidrofobik yüzeylerin hem laminer hem de türbülanslı sınır tabakası akımlarında sürtünmenin azalmasında daha etkili olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca, etkili sürtünme azalması için yüzeydeki hava tabakasının sabit kalınlıkta olmasının kritik öneme sahip olduğuna dikkat çekmişlerdir. Türbülanslı sınır tabakası akımındaki yüksek duvar kayma hızı ile yüzeydeki hava tabakası veya kabarcıklar azalıp tamamen kaybolabilmektedir. Bu durumda, yüzey su ile ıslanır ve süperhidrofobik yüzey desen pürüzlülüğünün sürtünmeyi daha da arttıracak ileri sürmüştür.

Moaven vd. [28], alüminyum disk yüzeyine süperhidrofobik özellik kazandırarak kaplamasız yüzeye kıyasla hidrolik sürtünme direncinin %15-30 kadar azaldığını belirlemişlerdir. Ayrıca, hidrofobik yüzeylerin sürtünme direncini büyük ölçüde azalttığını belirleyerek pompalama gücünü azaltmak için büyük bir potansiyel arz ettiğine dikkat çekmişlerdir. Özbek vd. [29] de deneysel olarak tipik santrifüj tip bir pompa çarkının ıslak yüzeylerini politetra floraitilen, floroiditilen propilen ve perfloro alkoksi olmak üzere 3 farklı karbon bazlı polimer malzeme ile kaplayarak sırasıyla 95°, 105° ve 110° temas açılarında elde ettikleri hidrofobik yüzeylerin hidrolik sürtünmeden kaynaklanan basınç kayıplarını düşürerek kaplamasız konvansiyonel çarka kıyasla pompa verimini sırasıyla yaklaşık %4, %5 ve %5.3 oranında artırdığını belirlemişlerdir.

Bir kargo gemisinin direnci üzerinde sürtünmenin katkısı %60-70, bir tankerde ise %80 oranındadır [30]. Tek başına nakliyenin küresel petrol arzı içindeki payı %8.5 [31] ve CO₂ emisyonları payı %3.3 oranındadır [32]. Hidrofobik yüzey oluşturularak sürtünme etkilerinin azaltılması, enerji tasarrufu sağlanması ve sera gazı azalımı için küresel ölçekte dikkate değer ölçüde bir potansiyele sahip olduğu görülmektedir. Park vd. [33] gemi gövdeleri için yaptıkları çalışmada 2.7 x 2.7 mm² süperhidrofobik ve pürüzsüz bir numune ile yapılan deney sonucunda ızgara parametrelerinin %75'e kadar türbülanslı akımda sürtünmeyi azaltmada etkili olduğunu ortaya koymuşlardır.

Bidkar vd. [34] türbülanslı akım rejimlerinde 10⁶ ile 9x10⁶ Reynolds sayıları aralığında deneysel olarak hidrofobik yüzeylerin yaklaşık olarak sürtünmeyi %20-30 oranında azalttığını belirlemişlerdir. Ayrıca, Reynolds sayısı arttıkça hidrofobik yüzeylerin havayı tutma kabiliyetinin azaldığı ve bu sebepten dolayı sürtünmedeki azalma oranının düştüğüne dikkat çekmişlerdir.

Bu çalışmada, pürüzsüz bakır borunun iç yüzeyleri 3 farklı karbon bazlı polimer malzeme ile kaplanarak elde edilen hidrofobik yüzeylerin türbülanslı boru akımında hidrolik sürtünme kaynaklı basınç kayıplarının azaltılması üzerine etkileri sürtünme faktörü belirlenerek ortaya konulmuştur.

II. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, floropolimer esaslı floroiditilenpropilen (FEP) malzemesi satın alma yoluyla tedarik edilerek ağırlıkça %1 oranında ayrı ayrı grafit ve grafit ilave edilerek mekanik olarak karıştırmak suretiyle, sırasıyla FEP-G ve FEP-C solüsyonları elde edilmiştir. Kütle ölçümleri için 0.1 mg hassasiyetli hassas terazi kullanılmıştır. Elde edilen FEP, FEP-G ve FEP-C kaplama malzemeleri ile bakır boru iç yüzeyi kaplanarak hidrofobik yüzeyler oluşturulmuştur.

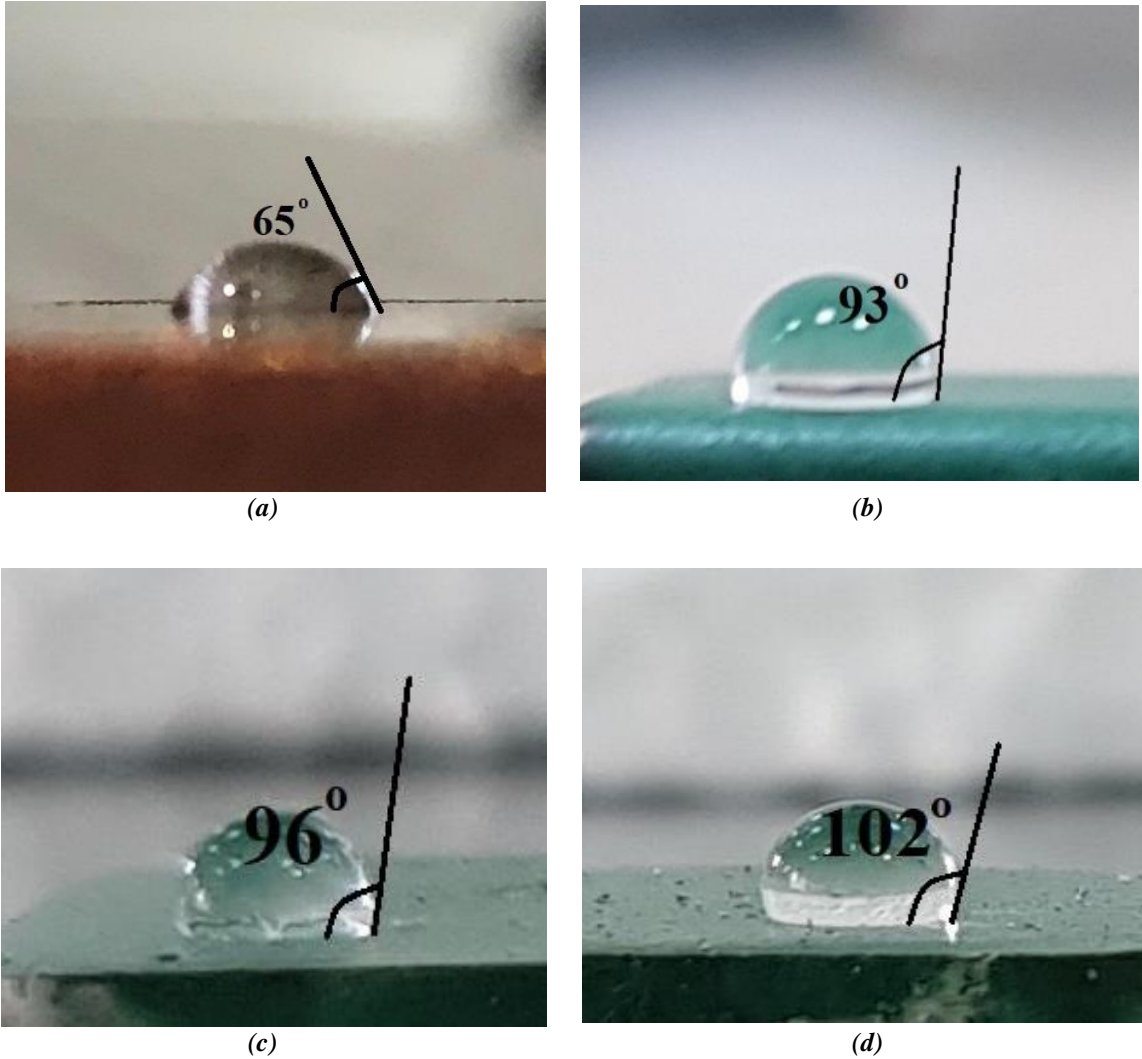
FEP, flor atomlarıyla doymuş uzun ve düz karbon zincirlerinden meydana gelmektedir. Atomları arasındaki kuvvetli bağlar sebebiyle FEP yüksek hidrofobik ve aşınma dayanımı özelliklerine sahiptir. FEP ile kaplanmış bakır plakanın kaplanmamış bakır plakaya kıyasla özgül aşınma miktarı %72 oranında daha düşüktür, dolayısıyla aşınma direncini oldukça yükseltmektedir [35]. Düşük mekanik sürtünme katsayısı ve yüksek kimyasal dirence sahip malzeme olan bu floropolimerin yapışma özelliği

de oldukça yüksektir. Diğer polimerlere göre daha yüksek sıcaklık dayanımları ve geniş bir çalışma sıcaklığı aralığına sahip olmaları sebebiyle birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Grafit, bilinen en iyi ısı iletkenlik, bakırdan 20 kat daha fazla elektrik iletkenliği ve 3500 °C'ye kadar yanmama, yani yüksek ısıya dayanıklılık gibi özelliklere sahiptir [36]. Grafen ise karbon nanotüp, fuleren ve grafitten oluşan bir tabakadır, ancak özellikleri itibarıyla bu yapılardan çok farklıdır. Grafen, birçok özelliğinin yanı sıra kolayca esneyebilmekte ve değişik formlardaki birçok malzemenin yüzeyine kolayca kaplanabilmektedir [37]. FEP malzemesine belirtilen oranlarda ilave edilen grafit ve grafen, uygulandığı yüzeydeki pürüzlülüğü arttırarak hidrofobikliğin artmasına katkı sağlamaktadır.

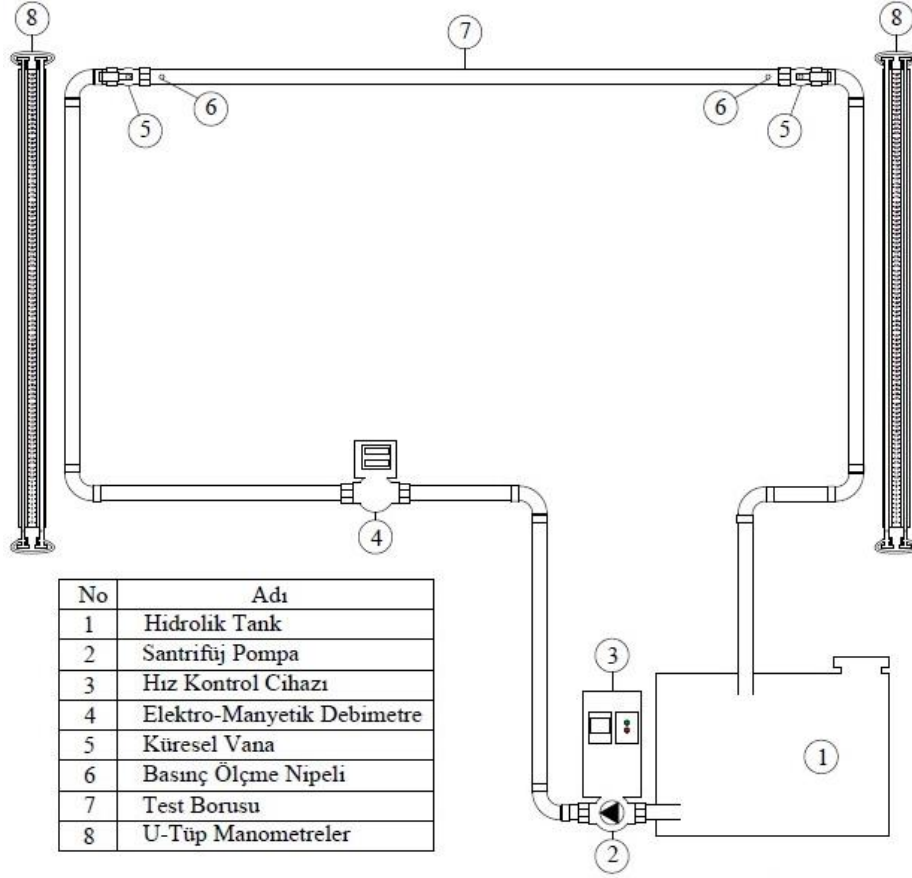
FEP, FEP-G ve FEP-C solüsyonları ile aynı tipteki iç çapı 15.8 mm ve 1 m uzunluğundaki 3 adet bakır borunun iç yüzeyi spray yöntemi ile kaplanmıştır. Kaplamanın bağlayıcılığını arttırmak için oda sıcaklığından 400 °C'ye kadar doğrusal olarak artırılarak ve 10 dakika süresince de bu sıcaklıkta bekletilerek ısı işleme tabi tutulmuştur.

Bakır boru iç yüzeyleri FEP, FEP-C ve FEP-G malzemeleri ile kaplanırken aynı yöntem ile bakır plaka numuneleri de kaplanmış ve bu plakalar üzerinden temas açıları ölçülmüştür. Ölçülen temas açıları Şekil 4'te verilmiştir. İşlenmemiş konvansiyonel bakır ve FEP, FEP-C, FEP-G ile kaplanan yüzeylerin temas açıları sırasıyla 65°, 93°, 96° ve 102° olarak belirlenmiştir.



Şekil 4. İşlenmiş ve işlenmemiş plakaların temas açıları (a) Pürüzsüz bakır plaka temas açısı (b) FEP kaplı bakır plaka temas açısı (c) FEP-C kaplı bakır plaka temas açısı (d) FEP-G kaplı bakır plaka temas açısı

Deney düzeneğinin şematik görünümü Şekil 5’te verilmiştir. Deney düzeneği genel olarak santrifüj pompa, elektro-manyetik debimetre, boru, U-tüp manometre, hidrolik tank ile vana ve dirsek gibi tesisat elemanlarından oluşan kapalı devre bir sistemdir.



Şekil 5. Deney düzeneğinin şematik görünümü

A. DATA ANALİZİ

Deneylerde belli bir Reynolds sayısında akım sağlamak için gerekli ortalama akım hızı;

$$Q = V \cdot A \quad (17)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır. Santrifüj pompanın devri, hız kontrol cihazıyla ayarlanarak belirli bir debide, dolayısıyla hızda akım oluşturulmuştur. Kararlı akım sağlandıktan sonra U-tüp manometre vasıtasıyla deney borusunun giriş ve çıkış kesitleri arasındaki statik basınç farkı ölçülmüştür. Eşt. 1 kullanılarak Darcy sürtünme faktörü belirlenmiştir. Deneyler esnasında K-tipi termal çift ile 15 °C olarak ölçülen çalışma akışkanı suyun bu sıcaklıktaki yoğunluk ve viskozite değerleri esas alınmıştır.

Eşt. 3’teki Blasius denkleminde göre ve deneylerde ölçülen basınç kaybı kullanılarak Eşt. 1’e göre Darcy sürtünme faktörleri belirlenmiştir.

Sürtünme faktörünün hidrofobik yüzeylerde aldığı değerlerin teorik olarak belirlenebilmesi için, m_t türbülanslı akım kayma katsayısını Eşt. 3’de verilen Blasius denkleminde entegre edersek hidrofobik sürtünme faktörü, f_h ;

$$f_h = \frac{0,316}{Re^{1/4}(1+m_t)} \quad (18)$$

şeklinde düzenlenebilir. Bu denklem hidrofobik yüzeyde kayma oluşması durumunda pürüzsüz yüzeyler için sürtünme faktörünü belirlemek amacıyla oluşturulmuştur. Hidrofobik lamina akım için Eş. 16'da verilen sürtünme faktörü denkleminde benzeştirilerek pürüzsüz hidrofobik türbülanslı akım için Eş. 18 türetilmiştir. Eş. 18'deki m_t eklentisi hidrofobik türbülanslı akım düzeltme katsayısı olarak anılabilir. Hidrofobik yüzeylerde kayma olması durumu ile alakalı bir katsayıdır, konvansiyonel yüzeylerde kayma olmaması durumunda yani yüzey hidrofobik değil iken $m_t = 0$ olacak ve Eş. 3'deki Blasius denklemindeki halini alacaktır. Eş. 18 ile Eş. 3 kıyas edilerek düzenlenirse, hidrofobik türbülanslı akım düzeltme katsayısı aşağıdaki gibi olur,

$$m_t = \frac{f}{f_h} - 1 \quad (19)$$

ve bu bağıntı kullanılarak türbülanslı akım düzeltme katsayıları belirlenmiştir.

Ölçülen parametreler ve doğrulukları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Ölçülen parametreler ve doğruluk değerleri

Ölçülen Parametreler	Doğruluk
Kütle, g	±%0.1
Temas açısı, °C	±%1
Basınç, mmSS	±0.5
Debi, m ³ /s	±%0.2
Sıcaklık, °C	±1

Ölçülen büyüklüklerin belirsizlikleri Eş. 20 [38] kullanılarak belirlenip Tablo 2'de verilmiştir.

$$w_r = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_{x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_{x_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_{x_n} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (20)$$

Burada,

- R : Hesaplanan büyüklük,
- x : Hesaplanan büyüklüğe etki eden bağımsız değişkenler,
- w_x : Bağımsız değişkenlere ait belirsizlik,
- w_r : Hesaplanan büyüklüğün belirsizliği.

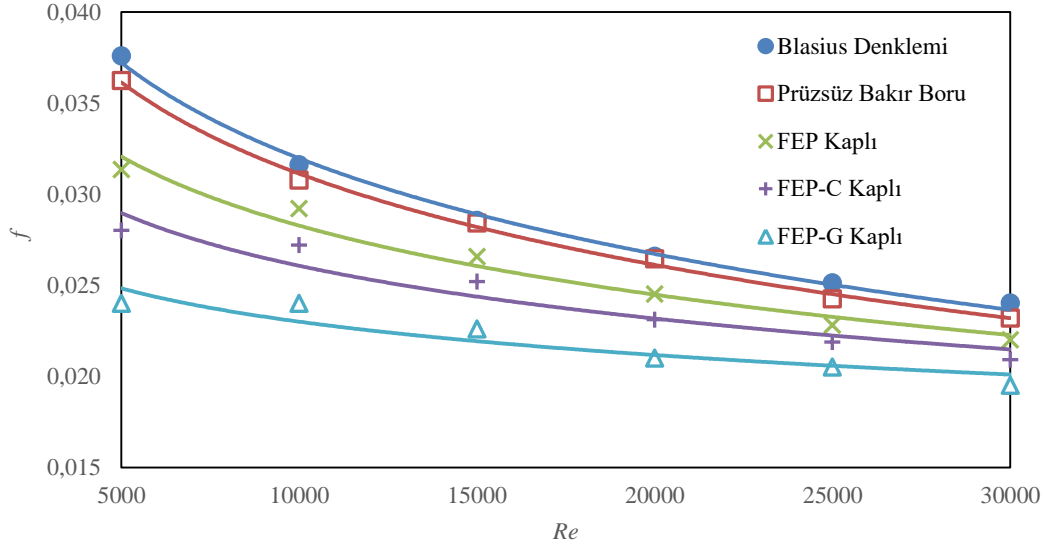
Tablo 2. Hesaplanan parametreler ve belirsizlikleri

Hesaplanan Parametreler	Doğruluk
Sürtünme Faktörü	±%0.19
Sürtünme faktörü düzeltme katsayısı	±%0.28
Reynolds sayısı	±%0.25

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

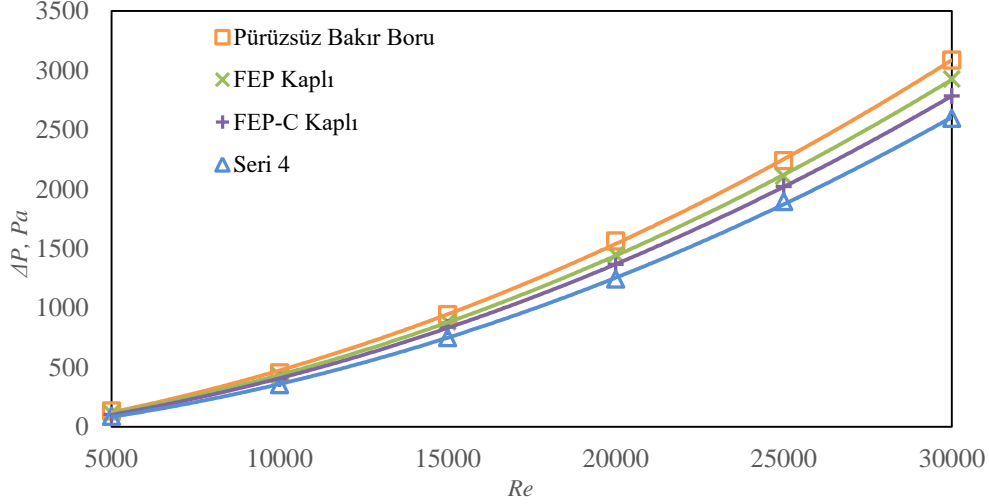
Şekil 6'da deneysel olarak konvansiyonel kaplanmamış bakır boru ile FEP, FEP-C ve FEP-G kaplı bakır borular için ve ayrıca Eş. 3'deki Blasius formülü kullanılarak belirlenen sürtünme faktörünün Reynolds sayına göre değişimi verilmiştir. Kaplamasız pürüzsüz borunun sürtünme faktörlerinin test edilen Reynolds sayısı aralığında Blasius denklemi ile yaklaşık %1 oranında uyum içinde olduğu ve hidrofobik yüzeyin sürtünme faktörünü dikkate değer ölçüde azalttığı açıkça görülmektedir. Sürtünme

faktöründeki en fazla düşüşün 5000 Reynolds sayısı değerinde, yani laminar akıma yakın akım rejiminde meydana geldiği ve sürtünme faktöründeki düşüşün Reynolds sayısı arttıkça azaldığı görülmektedir. Aynı zamanda FEP-G ile kaplı hidrofobik yüzeyin sürtünme faktörünü en fazla düşürdüğü, ikinci sırada FEP-C ile kaplı hidrofobik yüzeyin olduğu ve bu üç hidrofobik yüzey arasında en az seviyede sürtünme faktöründeki düşüşün FEP malzeme ile kaplı hidrofobik yüzeyde meydana geldiği görülmektedir. Dolayısıyla, grafit ve grafen katkılı kompozit malzeme ile elde edilen hidrofobik yüzeylerin sürtünme faktörünü temel malzeme ile kaplı hidrofobik yüzeye kıyasla daha fazla oranda düşürdüğü sonucuna varılmıştır.



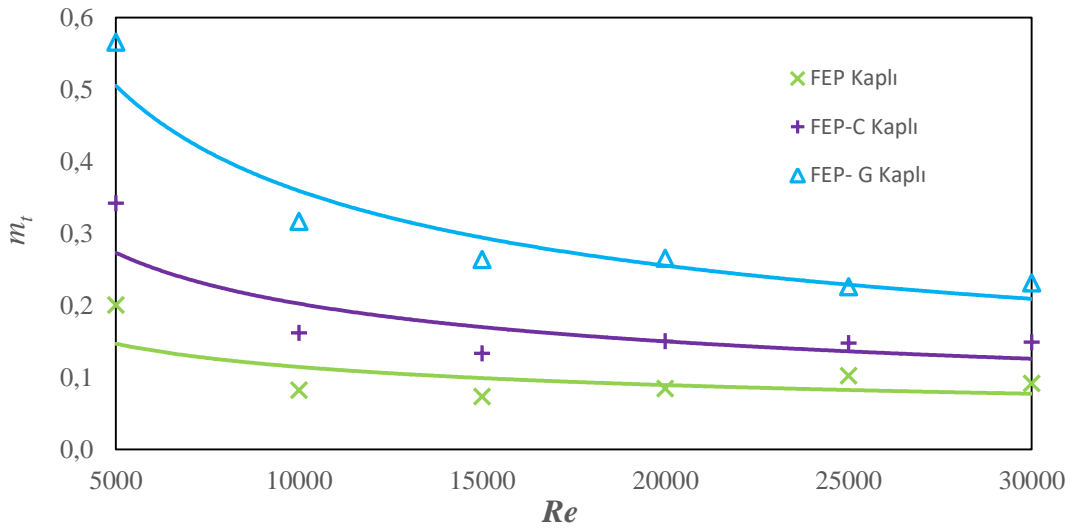
Şekil 6. Sürtünme faktörünün Reynolds sayısına göre değişimi

Şekil 7’de kaplamasız konvansiyonel bakır boru, FEP, FEP-C, FEP-G ile kaplı hidrofobik bakır borularda meydana gelen basınç kaybının Reynolds sayısına göre değişimi verilmiştir. Basınç kaybının Reynolds sayısı arttıkça parabolik olarak arttığı, fakat düşük Reynolds sayısında (yaklaşık 5000, laminar akım rejimine yakın) hidrofobik yüzeylerin basınç kaybını konvansiyonel yüzeye kıyasla neredeyse değiştirmedeği, türbülanslı akım geliştikçe, yani Reynolds sayısı arttıkça basınç kaybındaki düşüşün dikkate değer ölçüde olduğu görülmektedir. Haliyle, basınç kaybındaki düşüşün sıralaması sürtünme faktöründeki ile paralellik göstermektedir. FEP-G, FEP-C ve FEP malzemesi ile kaplı hidrofobik yüzey temas açıları sırasıyla 102°, 96° ve 93°’dir ve sürtünme faktörü ile basınç kaybındaki düşüşler de benzer şekilde gelişmektedir. Yani, basınç kaybı ve sürtünme faktöründeki düşüşlerin temas açısı, yani hidrofobiklikle orantılı olarak geliştiği görülmektedir.



Şekil 7. Basınç kaybının Reynolds sayısına göre değişimi

Şekil 8’de FEP, FEP-C ve FEP-G ile kaplı hidrofobik bakır boruların Eşit. 19’a göre hesaplanan hidrofobik türbülanslı akım düzeltme katsayılarının Reynolds sayısına göre değişimi verilmiştir. m_t düzeltme katsayısı Reynolds sayısı arttıkça parabolik olarak azalmaktadır. Ancak bu paraboliklik Reynolds sayısı arttıkça azalmaktadır. Dolayısıyla, Reynolds sayısı arttıkça yüzeyde kayma azalmaktadır. Bu durumun yüzeyde katı-sıvı arasındaki nano veya mikro ölçekteki pürüzlerde hapsolan hava katmanının [21, 29], ve Reynolds sayısı arttıkça laminer alt tabakanın deforme olması ve buna bağlı gelişen Reynolds gerilmelerinin etkisiyle [14, 34], meydana geldiği söylenebilir. Şekil 8’e göre 5000 – 30000 Reynolds sayısı aralığında FEP-G ile kaplı hidrofobik bakır boru en yüksek türbülanslı akım sürtünme faktörü düzeltme katsayısına sahiptir. Bu durum da sürtünme faktöründeki düşüşe paralellik göstermektedir. Yani, en yüksek temas açısına sahip FEP-G ile kaplı hidrofobik yüzey sürtünme faktörünü en yüksek oranda düşürmektedir. Dolayısıyla, sürtünme faktörünü etkileyen en önemli faktörün kayma katsayısı veya diğer adıyla hidrofobik akım düzeltme katsayısı olduğu görülmektedir. Grafik genel olarak incelendiğinde 10000 Reynolds sayısı değerinden sonra hidrofobik türbülanslı akım düzeltme katsayısı m_t ’nin Reynolds sayısı arttıkça hemen hemen değişmediği, FEP için 0.09, FEP-C için 0.15, FEP-G için ise yaklaşık 0.26 değerinde olduğu görülebilmektedir.



Şekil 8. Pürüzsüz hidrofobik türbülanslı akım sürtünme faktörü düzeltme katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi

IV. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada pürüzsüz bakır boru iç yüzeyleri floro polimer esaslı FEP, FEP-C, FEP-G malzemeler ile kaplanarak elde edilen hidrofobik yüzeylerin 5000 - 30000 Reynolds sayısı aralığındaki türbülanslı akımda sürtünme faktörü ve basınç kaybı üzerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir.

Elde edilen yüzeylerin hidrofobikliği temas açısı ölçülerek belirlenmiştir. Konvansiyonel bakır yüzeyin temas açısı 65° iken sırasıyla FEP, FEP-C, FEP-G kaplı yüzeylerin temas açıları 93° , 96° ve 102° olarak ölçülmüştür. Grafit ve grafen katkılı kompozit malzemeler ile daha yüksek hidrofobiklik elde edilmiştir. Temas açısı en düşük olan FEP kaplı hidrofobik boruda, konvansiyonel bakır boruya kıyasla sürtünme faktöründeki azalma en azdır, en yüksek azalma ise temas açısı, yani hidrofobikliği en yüksek kompozit bir malzeme olan FEP-G ile kaplı hidrofobik boruda meydana gelmiştir ve 5000 - 30000 Reynolds sayısı aralığında sürtünme faktöründe %18.4-36.1 aralığında azalma meydana geldiği belirlenmiştir. Sonuç olarak, hidrofobiklik arttıkça sürtünme faktöründeki azalma artmaktadır. Aynı zamanda, türbülanslı pürüzsüz hidrofobik boru akımları için sürtünme faktöründeki ve buna bağlı sürtünme kaynaklı basınç kaybındaki düşüşün Reynolds sayısı arttıkça arttığı belirlenmiştir.

Bu çalışmada ayrıca boru akımlarında teorik hesaplamalar için kayma sınır şartı ve buna bağlı olarak sürtünme faktörünün belirlenmesine yönelik öneride bulunulmuştur. Hidrofobik laminer akım için teorik olarak elde edilen sürtünme faktörü denkleminde yer alan m_1 kayma katsayısından esinlenerek, pürüzsüz türbülanslı akım Blasius sürtünme faktörü denklemi hidrofobik yüzeyler için uyarlanmıştır. Aynı zamanda, sürtünme faktörünü etkileyen en önemli faktörün kayma katsayısı veya diğer adıyla hidrofobik akım düzeltme katsayısı olduğu ortaya konmuştur.

İleriye yönelik daha farklı malzemeler ile ve daha yüksek hidrofobiklikte elde edilecek hidrofobik yüzeylerin ve ayrıca pürüzlülüğün de daha geniş Reynolds sayısı aralığında sürtünme faktörü üzerine etkilerinin hem teorik hem de deneysel olarak incelenmesine ihtiyaç vardır.

V. KAYNAKLAR

- [1] Z. Yumurtacı and A. Sarıgül, "Santrifüj Pompalarda Enerji Verimliliği ve Uygulamaları," *Makina Mühendisleri Odası Tesisat Mühendisliği Derg.*, pp. 49–58, 2011.
- [2] P. Zhang and F. Y. Lv, "A review of the recent advances in superhydrophobic surfaces and the emerging energy-related applications," *Energy*, vol. 82, pp. 1068–1087, 2015.
- [3] L. Oberli, D. Caruso, C. Hall, M. Fabretto, P. J. Murphy, and D. Evans, "Condensation and freezing of droplets on superhydrophobic surfaces," *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 210, pp. 47–57, 2014.
- [4] F. E. Kartal, "Nanokompozit süperhidrofobik yüzey sentezi ve karakterizasyonu." Yüksek lisans tezi, Kimya Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2009.
- [5] H. Blasius, "The law of similarity applied to friction phenomena," *Phys. Z.*, vol. 12, pp. 1175–1178, 1911.
- [6] C. Wang, F. Tang, Q. Li, Y. Zhang, and X. Wang, "Spray-coated superhydrophobic surfaces with wear-resistance, drag-reduction and anti-corrosion properties," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 514, pp. 236–242, 2017.

- [7] D. C. Tretheway and C. D. Meinhart, "Apparent fluid slip at hydrophobic microchannel walls," *Phys. fluids*, vol. 14, no. 3, pp. L9–L12, 2002.
- [8] A. Ríos-Rodríguez, C. A. Palacios-Morales, E. Bernal, G. Ascanio, and J. P. Aguayo-Vallejo, "Effect of hydrophobic coating on Hagen-Poiseuille flows," *J. Appl. Fluid Mech.*, vol. 9, no. 3, pp. 1035–1040, 2016.
- [9] J. Ou and J. P. Rothstein, "Direct velocity measurements of the flow past drag-reducing ultrahydrophobic surfaces," *Phys. fluids*, vol. 17, no. 10, pp. 103606, 2005.
- [10] C. Ybert, C. Barentin, C. Cottin-Bizonne, P. Joseph, and L. Bocquet, "Achieving large slip with superhydrophobic surfaces: Scaling laws for generic geometries," *Phys. fluids*, vol. 19, no. 12, pp. 123601, 2007.
- [11] C. Henoch, T. Krupenkin, P. Kolodner, J. Taylor, M. Hodes, A. Lyons ve K. Breuer, "Turbulent drag reduction using superhydrophobic surfaces," in *3rd AIAA Flow Control Conference*, 2006, pp. 3192.
- [12] R. J. Daniello, N. E. Waterhouse, and J. P. Rothstein, "Drag reduction in turbulent flows over superhydrophobic surfaces," *Phys. Fluids*, vol. 21, no. 8, pp. 85103, 2009.
- [13] R. Truesdell, A. Mammoli, P. Vorobieff, F. van Swol, and C. J. Brinker, "Drag reduction on a patterned superhydrophobic surface," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 97, no. 4, pp. 44504, 2006.
- [14] M. B. Martell, J. P. Rothstein, and J. B. Perot, "An analysis of superhydrophobic turbulent drag reduction mechanisms using direct numerical simulation," *Phys. Fluids*, vol. 22, no. 6, pp. 65102, 2010.
- [15] M. B. Martell, J. B. Perot, and J. P. Rothstein, "Direct numerical simulations of turbulent flows over superhydrophobic surfaces," *J. Fluid Mech.*, vol. 620, pp. 31–41, 2009.
- [16] K. Jeffs, D. Maynes, and B. W. Webb, "Prediction of turbulent channel flow with superhydrophobic walls consisting of micro-ribs and cavities oriented parallel to the flow direction," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 53, no. 4, pp. 786–796, 2010.
- [17] B. Woolford, J. Prince, D. Maynes, and B. W. Webb, "Particle image velocimetry characterization of turbulent channel flow with rib patterned superhydrophobic walls," *Phys. Fluids*, vol. 21, no. 8, pp. 85106, 2009.
- [18] H. Tian, J. Zhang, E. Wang, Z. Yao, and N. Jiang, "Experimental investigation on drag reduction in turbulent boundary layer over superhydrophobic surface by TRPIV," *Theor. Appl. Mech. Lett.*, vol. 5, no. 1, pp. 45–49, 2015.
- [19] A. V Volkov et al., "Analysis of the effect of hydrophobic properties of surfaces in the flow part of centrifugal pumps on their operational performance," *Therm. Eng.*, vol. 62, no. 11, pp. 817–824, 2015.
- [20] M. Chinappi and C. M. Casciola, "Intrinsic slip on hydrophobic self-assembled monolayer coatings," *Phys. Fluids*, vol. 22, no. 4, pp. 42003, 2010.

- [21] C. Cottin-Bizonne, B. Cross, A. Steinberger, and E. Charlaix, “Boundary slip on smooth hydrophobic surfaces: Intrinsic effects and possible artifacts,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 94, no. 5, pp. 56102, 2005.
- [22] N. M. Nouri, S. Sekhavat, and A. Mofidi, “Drag reduction in a turbulent channel flow with hydrophobic wall,” *J. Hydrodyn. Ser. B*, vol. 24, no. 3, pp. 458–466, 2012.
- [23] T. O. Jelly, S. Y. Jung, and T. A. Zaki, “Turbulence and skin friction modification in channel flow with streamwise-aligned superhydrophobic surface texture,” *Phys. Fluids*, vol. 26, no. 9, pp. 95102, 2014.
- [24] S. Fialová, F. Pochylý, M. Kotek, and D. Jašíková, “Velocity profiles of fluid flow close to a hydrophobic surface,” in *EPJ Web of Conferences*, 2017, pp. 2023.
- [25] F. Simona, P. František, H. Michal, and M. Jiří, “Influence of boundary conditions on fluid flow on hydrophobic surfaces,” in *AIP Conference Proceedings*, 2017, vol. 1889, no. 1, pp. 20008.
- [26] F. Pochylý, S. Fialová, and M. Havlásek, “New boundary conditions for fluid interaction with hydrophobic surface,” in *EPJ Web of Conferences*, 2018, pp. 2084.
- [27] E. Aljallis, M. A. Sarshar, R. Datla, V. Sikka, A. Jones, and C.-H. Choi, “Experimental study of skin friction drag reduction on superhydrophobic flat plates in high Reynolds number boundary layer flow,” *Phys. fluids*, vol. 25, no. 2, pp. 25103, 2013.
- [28] K. Moaven, M. Rad, and M. Taeibi-Rahni, “Experimental investigation of viscous drag reduction of superhydrophobic nano-coating in laminar and turbulent flows,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 51, pp. 239–243, 2013.
- [29] M. Özbey, M. Gürbüz, and U. Karakurt, “Hidrofofik çark yüzeylerinin santrifüj tip bir pompa performansına etkilerinin deneysel incelenmesi,” *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimar. Fakültesi Derg.*, vol. 36, no. 1, pp. 267–274, 2021.
- [30] K. Fukuda, J. Tokunaga, T. Nobunaga, T. Nakatani, T. Iwasaki, and Y. Kunitake, “Frictional drag reduction with air lubricant over a super-water-repellent surface,” *J. Mar. Sci. Technol.*, vol. 5, no. 3, pp. 123–130, 2000.
- [31] J. P. Winkler, (2008, June 24) “Shipping wasting 4.37 million barrels of oil a day,” Reuters Press Release. [Online]. Available: <http://www.reuters.com/article/2008/06/24/idUS8232>
- [32] X. Qi and D.-P. Song, “Minimizing fuel emissions by optimizing vessel schedules in liner shipping with uncertain port times,” *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 48, no. 4, pp. 863–880, 2012.
- [33] H. Park and G. Sun, “Superhydrophobic turbulent drag reduction as a function of surface grating parameters,” *J. Fluid Mech.*, vol. 747, pp. 722–734, 2014.
- [34] R. A. Bidkar, L. Leblanc, A. J. Kulkarni, V. Bahadur, S. L. Ceccio, and M. Perlin, “Skin-friction drag reduction in the turbulent regime using random-textured hydrophobic surfaces,” *Phys. Fluids*, vol. 26, no. 8, pp. 85108, 2014.

- [35] M. Pehlivan, U. Karakurt, M. Özbey, and M. Gürbüz, “Floro Polimer Kaplamanın Bakır Plaka Üzerine Uygulanması ve Aşınma Üzerine Etkisinin İncelenmesi,” in *3rd International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies*, 2019, pp. 408–410.
- [36] A. D. Cuhadaroğlu and K. Erdal, “Grafit: Bir genel değerlendirme,” *Tek. Bilim. Derg.*, vol. 8, no. 1, pp. 14–33, 2018.
- [37] M. C. Şenel, M. Gürbüz, and K. O. Ç. Erdem, “Grafen takviyeli alüminyum matrisli yeni nesil kompozitler,” *Mühendis ve Makina*, vol. 56, no. 669, pp. 36–47, 2015.
- [38] J. P. Holman, “Experimental Methods for Engineers,” *McGraw-Hill*, 5th Edition, 1989.